

EXOS-A 衛星で観測された LHR ホイスラ

柴田 喬・芳野赳夫・中村良治・伊藤富造

LHR Whistlers Observed by EXOS-A

Takashi SHIBATA*, Takeo YOSHINO*, Yoshiharu NAKAMURA**
and Tomizo ITOH**

Abstract: LHR (lower hybrid resonance) whistlers have been found in the mid-latitude records from a broadband VLF receiver aboard the EXOS-A satellite. Characteristics of the LHR whistlers are the successive enhancement of dispersion and the frequency resonance, in the vicinity of the local LHR frequency. The resonance phenomenon of the LHR whistlers has been interpreted as a nonducted propagation of whistler-mode waves with a large wave normal angle in the magnetospheric plasma, whose density gradient is nearly perpendicular to the earth's magnetic field.

要旨 EXOS-A 衛星で観測された LHR ホイスラの諸特性を解析し、その解釈のために1つの伝搬機構モデルを提出する。LHR ホイスラのスペクトルの特徴は、周波数が下かるとともに分散値が増大し、局所 LHR 周波数の近くで共鳴状態となることにある。その共鳴現象を説明するためには、地球磁界にはほぼ垂直な方向にプラズマ密度勾配が存在する必要がある。LHR ホイスラは、そのような勾配を持つプラズマ圏の中を、共鳴角に近い大きな wave normal angle で非ダクト伝搬しているホイスラモード波であると思われる。

1. は じ め に

磁気圏プラズマ中での低周波波動の伝搬や姿態を論じる場合、その伝搬形態をダクト伝搬と非ダクト伝搬にわけて扱う方法がよくとられている。ダクト伝搬とは、電子密度が磁力線に沿ってまわりよりすこし大きくなっているか、または小さくなっている領域（いわゆるダクト）に波が捕捉されて伝搬するものであり、非ダクト伝搬とは、そのようなダクトがない場合か、またはダクトがあってもそれに無関係に波が伝搬する形態である。非ダクト伝搬の場合には、波の wave normal は地球磁界方向から大きくはすれることがあり、そのような

* 電気通信大学応用電子工学科 Department of Applied Electronic Engineering, University of Electro-Communications, 5-1, Chofugaoka 1-chome, Chofu 182

** 東京大学宇宙航空研究所, Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, 6-1, Komaba 4-chome, Meguro-ku, Tokyo 153

ものは高密度成層構造の電離層領域を通過することができず、地上まで到達し得ない。すなわち、地上観測で得られる波動は、そのほとんどがダクト伝搬してきたものと考えられ、非ダクト伝搬の現象をみるためには、人工衛星観測のように、電離層領域の外側で波動をとらえる方法が有効である。

過去いろいろな衛星が非ダクト伝搬の現象をとらえ報告しているが、その代表的なものとしては、OGO-1 衛星で最初に観測された MR (magnetospherically reflected) ホイストラがあげられる (SMITH and ANGERAMI, 1968) この MR ホイストラは、KIMURA (1966) による、多種イオンを考慮した拡散平衡型プラズマ媒質中での ray tracing の結果や、THORNE and KENNEL (1967) による低周波波動の伝搬機構の解析から、その存在が予測されていたもので、非ダクト伝搬しているがために波の wave normal angle が大きく、したがって局所的な LHR (lower hybrid resonance) 周波数が波の周波数を越えるような領域の近傍で ray 方向の反転がおり、プラズマ圏内を行き来しているホイストラ波であると解釈されている。WT (walking-trace) ホイストラもまた特異な非ダクト伝搬現象の 1 つである。その観測領域は緯度的に限られかつ夜間部に集中しており、スペクトルは時間とともに周波数が上昇する rising tone で、顕著な高域および低域しゃ断を示している。WALTER and ANGERAMI (1969) は、磁力線に垂直な方向にも若干の電子密度勾配を有するような拡散平衡プラズマモデルを用いて ray tracing をおこない、WT ホイストラの種々のスペクトル特性に説明を与え、さらに逆にこの WT ホイストラ現象から、プラズマ媒質の構造に関する情報を得る可能性を示唆している。

本論文で述べる LHR (lower hybrid resonance) ホイストラもまた、非ダクト伝搬をしている現象であると思われるが、その観測例は少なく、くわしい伝搬機構についてはまた明確にされていない (HELLIWELL, 1969)。ここでは、科学衛星 EXOS-A によって観測された LHR ホイストラ現象の諸性質を解析し、それらを解釈するための 1 つの伝搬機構モデルを提出する。

2. 観 測 機 器

科学衛星 EXOS-A は、極域でのオーロラとその関連現象を観測することを主目的としている。その初期軌道は、近地点 634 km, 遠地点 3978 km, 軌道傾斜角 65.4° の準極軌道で、周期は約 130 分であった。搭載機器の 1 つであるプラズマ波動観測装置は、全長約 4.5 m のダイポールアンテナとファラデーカップを用いて、0.4–30 kHz の VLF 広帯域観測と、45 kHz–3 MHz の中の 11 個の固定周波数における LF・MF 狭帯域観測とをおこなっている。機器構成等の詳細は別に記述されているので (柴田他, 1979), それを参照されたい。

VLF 広帯域観測データは、南極域については昭和基地の受信局で、中低緯度プラズマ圏内については鹿児島内之浦の追跡局 (KSC 局) で、それぞれ実時間で取得されている。ここでの主題である LHR ホイスラは、ダイポールアンテナを用いた VLF 帯観測データのうち、KSC 局で得られた中緯度データの中に見出されたものである。

3. LHR ホイスラの特性

観測された LHR ホイスラの周波数-時間 スペクトルの典型的なものを、図 1 に示す。ス

Feb. 9, 1978

$H \approx 3690 \text{ km}$, $\text{INV. LAT.} \approx 53.5^\circ$

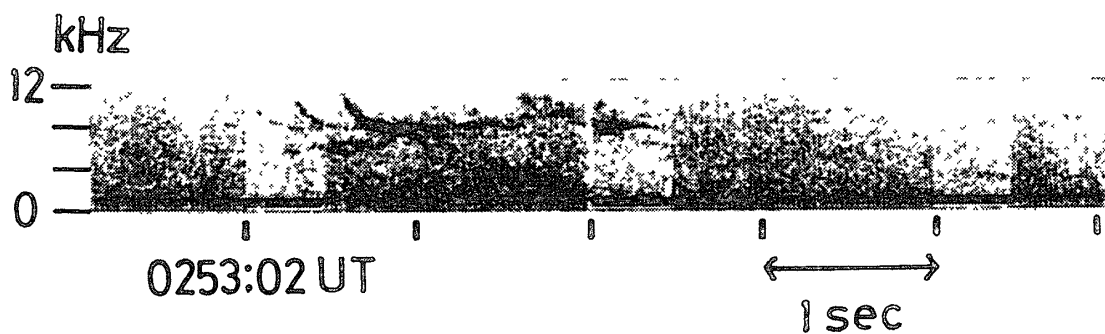


図 1 LHR ホイスラのスペクトルの典型例。2 秒周期の背景雑音レベルの変動は、衛星内部での機器雑音の干渉によるものである

*Fig 1 Frequency-time spectrogram of LHR whistler observed by EXOS-A satellite
Periodical variation of background noise level is caused by the interference of sub-system noise repeated every 2 seconds*

ペクトル上に見られる 2 秒周期の広帯域な背景雑音レベルの変動は、衛星内部での機器雑音の干渉によるもので、プラズマ中の波動現象でも衛星のスピン効果でもない。スペクトルから明らかなように、LHR ホイスラは、通常のホイスラ空電と同様に低い周波数成分ほど到達時間の大きい falling tone となっているが、その分散値はいわゆる Eckersley 分散とはならず、周波数が下がるとともに大きくなっており、ある周波数 (図 1 の例では約 8 kHz) で共鳴を起こすという特徴がある。共鳴周波数は局所 LHR 周波数に近い値であり、このことがその名称の由来になっていると思われる。

このような LHR ホイスラが受信されたのは、1978 年 2 月 9 日の Rev 52 の軌道であった。観測領域は、図 2 に示すように、北半球中緯度プラズマ圏の昼間側で、 $L \approx 3.7-24$ 、高

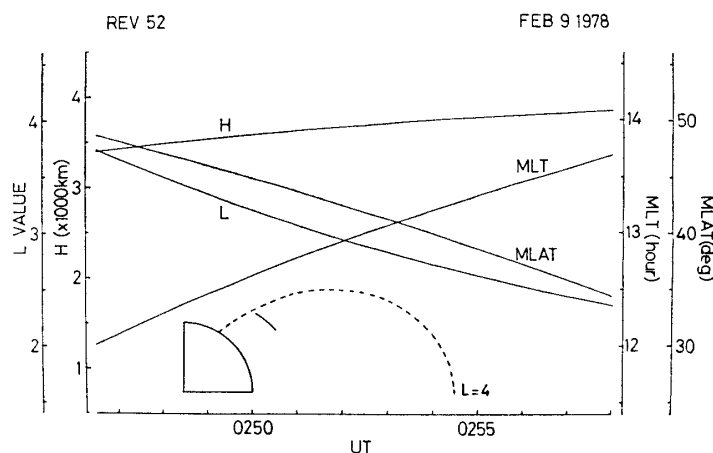


図 2 Rev. 52 で VLF 帯波動観測をおこなった時の衛星軌道. 図中の挿入図は磁気子午面内での軌道をあらわす

Fig. 2 Southbound path of EXOS-A satellite in Rev. 52. The inserted figure shows its trajectory in the geomagnetic meridian

度 $H \simeq 3400\text{--}3800$ km の領域であるが, LHR ホイスラが受信されたのは, $L \simeq 3.5\text{--}2.7$ の間であり, それより高緯度でも低緯度でも受信されていない. この時の Kp 指数は 2^- で, その前 1 週間の最大値も 4^0 にしか過ぎず, ほぼ静穏状態であったと思われる. したがって, LHR ホイスラが受信された領域は, 静穏時のプラズマポーズの位置 ($L \simeq 4$, CARPENTER, 1966) より十分内側のプラズマ圏内であると思われる.

図 3 は, LHR ホイスラのスペクトルが衛星の移動とともにどのように変化しているかを見るために, 約 1 分毎に現象を抽出し時間の経過に従って並べたものである. 0247 UT 頃には, 通常のホイスラ空電とその上端付近から放出されている LHR ノイズと思われる波動があるだけであるが, 0248 UT 頃より以降になると LHR ホイスラが受信されている. そして, 衛星が低緯度領域へ移動するにしたがって, まず, 共鳴周波数が徐々に上昇しており, さらに, 共鳴周波数より上の falling tone 部分のスペクトル傾斜がゆるやかになっていく, すなわち分散値が大きくなっていく傾向が認められる. 共鳴周波数をスペクトルから読み取り, その L 値依存性を見たものが図 4 である. $L \simeq 3.15$ より高 L 値側領域で観測された LHR ホイスラの共鳴周波数は, 5.8 ± 0.2 kHz てほぼ一定であるが, それより低 L 値側では L 値の減少とともに上昇し, $L \simeq 2.9$ で約 8 kHz となっている. その後共鳴周波数は約 6.5 kHz まで不連続に減少し, $L \simeq 2.7$ での約 10 kHz の値まで, また L 値の減少とともに上昇している. $L = 2.7$ の時の衛星位置での電子サイクロトロン周波数は約 330 kHz であり, プラズマ密度を無限大と仮定した LHR 周波数の極限值はたかだか 7.7 kHz 程度にしかなら

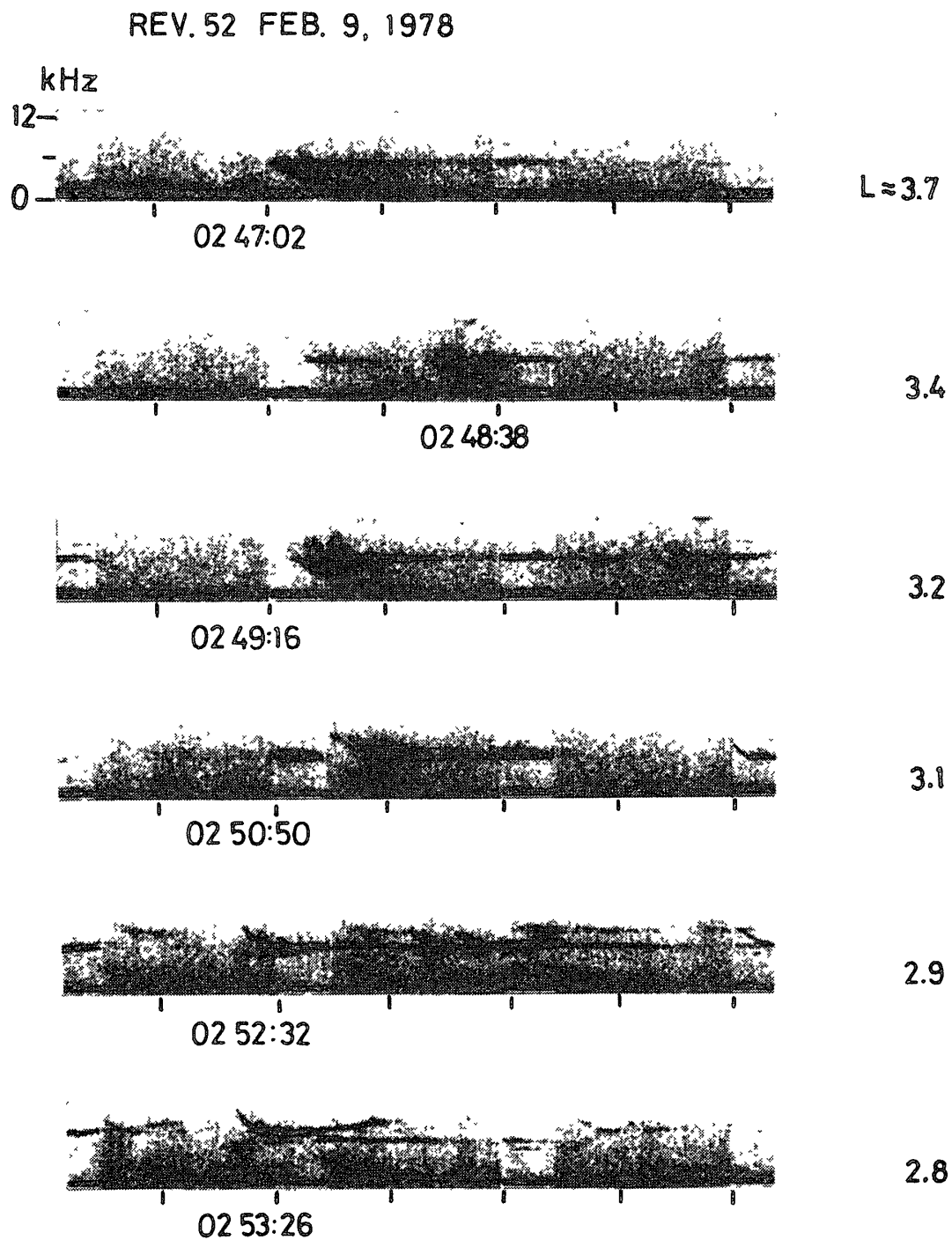


図 3 LHR ホイスラのスペクトルの衛星の移動にともなう変化

Fig 3 Typical spectrograms of LHR whistler, arranged in the order of observation time and appended with the L values

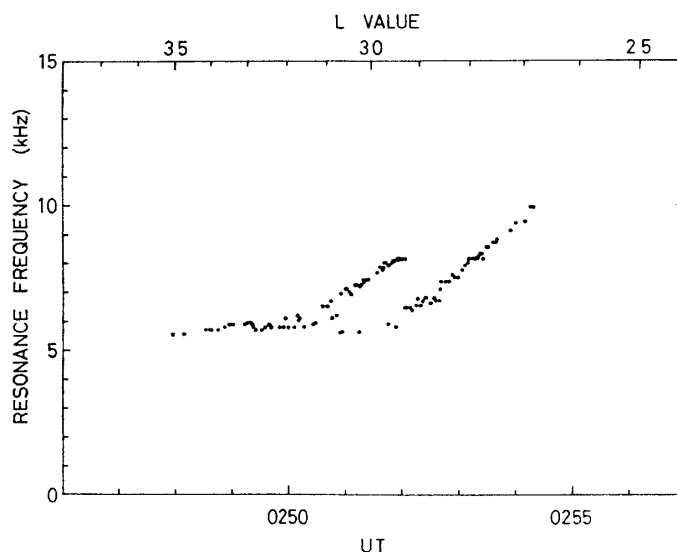


図 4 LHR ホイスラの共鳴周波数の変化

Fig. 4. Variation of resonance frequency observed in Rev 52

す，得られた共鳴周波数 10 kHz を局所 LHR 周波数そのものと解釈することは困難であり，LHR 周波数より高い周波数での共鳴の機構が必要とされる。

得られた LHR ホイスラのスペクトルに関してもう 1 点注目されることは，図 3 最下段のスペクトル例に見られるように，LHR ホイスラの尾部が共鳴周波数に達した後，再度周波数的に上昇している点である．この様な形の LHR ホイスラの受信頻度は，非常に少なく，さらに，おおむね低 L 値領域での受信に限られている。

4. LHR ホイスラの伝搬機構モデル

ホイスラモードの波動の伝搬を定性的に見るために，まず磁気圏プラズマをコールドと仮定し，その中での R-モードの分散を考えてみる．高度 4000 km のプラズマ圏内での R-モード波の ω - k 関係を試算すると図 5 のようになる．ここで， ω , k 軸はそれぞれ電子サイクロトロン周波数およびその真空中での波数で正規化してある．周知のように，局所 LHR 周波数より低い周波数では，屈折率はすべての wave normal angle で有限となり，屈折率曲面は閉じた形状となるが，LHR 周波数より高い周波数では resonance cone が存在し，波が大きな wave normal angle を持つとき共鳴状態となる可能性がある．このことは，前節で述べた観測結果の 1 つの，局所 LHR 周波数より高い周波数での共鳴という事実の解釈にとって好都合である．しかし，大きな wave normal angle で伝搬するという条件だけでは共鳴は起らない．たとえばプラズマ圏が，基準レベルでの諸量が磁気緯度依存性をもっていないよ

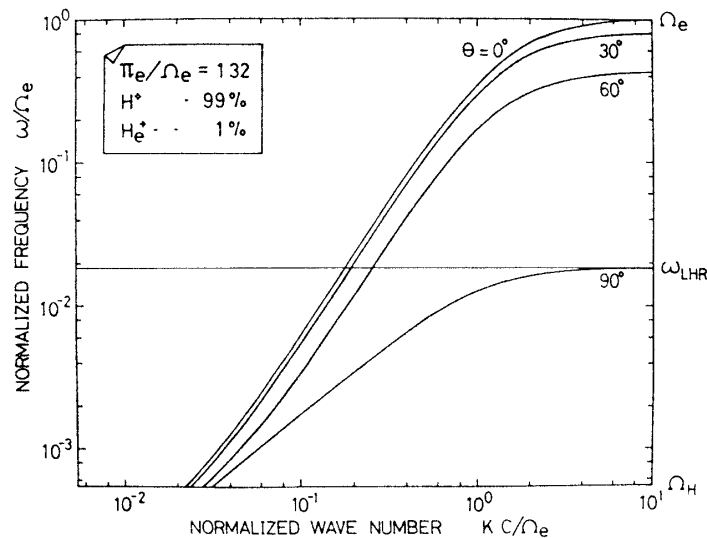


図 5 コールトプラズマ中の R モード波の正規化 ω - k 図表

Fig. 5 Normalized ω - k diagram of the right-handed polarized mode in cold plasma for several wave normal angles

うな，またはもっていても非常に小さな依存性であるような拡散平衡型プラズマ分布で近似できるとすると，大きな wave normal angle でその中を伝搬するホイスラ波は，MR ホイスラのように反射が起こる可能性があるだけで，共鳴は，赤道領域をのぞいては起こり得ない．したがって，大きな wave normal angle で非ダクト伝搬するということは，LHR ホイスラの共鳴現象を説明するための必要条件ではあるが十分条件ではなく，媒質のプラズマ構造に関する別の条件が要求される．

LHR ホイスラの伝搬機構の 1 つのモデルとして，地球磁力線にほぼ垂直に近い方向に電子密度勾配をもつようなプラズマ媒質中での非ダクト伝搬を考えたものが，図 6 である．図 6a は，衛星高度で観測される LHR ホイスラスペクトルのモデルであり，波動成分として，共鳴周波数 f_R とその前後の周波数 f_L, f_U の 3 つの波を考えると，図 6b のような ray path をそれぞれとっている必要がある．ここで○印は，屈折率が無限大となる共鳴の場所を示している．観測された LHR ホイスラのスペクトル上で，共鳴周波数より高い周波数成分しか波動として受信されていないことを解釈するためには，波は高高度から地球方向へ降りてくるような伝搬経路をとっており，さらに，図 6b の 3 つの ray path に示されるように，周波数が高いほどより低高度で共鳴状態となる必要がある．

Snell の法則にしたがえば，波動は，屈折率一定の境界面への屈折率ベクトルの投影成分が保存されるような経路を伝搬する．いいかえると，ある波動に対して取り得る屈折率ベク

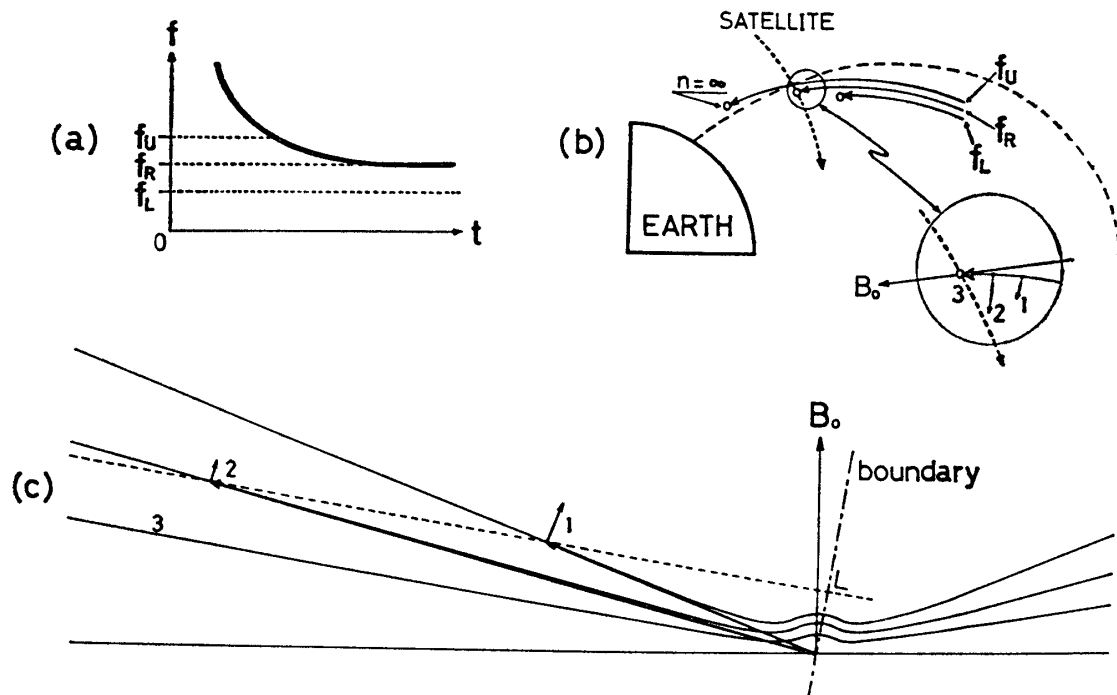


図 6 LHR ホイスラの伝搬機構モデル. (a) 衛星機上で観測されるスペクトラム. (b) 周波数 f_L , f_R , f_U の波の ray path. ○印の点はそれぞれ共鳴状態となる場所を示し, 拡大図は, 周波数 f_R の波の共鳴点近傍での ray path を, wave normal 方向とともに示す. (c) 周波数 f_R の波に対する共鳴点近くでの屈折率曲面. 点線は, 屈折率一定の境界面へ下ろした垂線である.

Fig 6 Interpretation of LHR whistler (a) Idealized spectrogram observed in satellite, (b) Ray paths at frequencies f_L , f_R , and f_U . Each ray path terminates at a resonance point denoted by the open circle in the figure. The enlarged sketch in the figure shows the ray path in the vicinity of the resonance point, with wave normal directions. (c) Refractive-index surfaces (not strictly to scale) in the vicinity of the resonance point. Dashed line is perpendicular to surfaces of constant refractive index.

トルの先端は, 屈折率一定の境界面に下ろした垂線上にすべて乗る必要がある. その状況を LHR ホイスラの場合について模範的に示したものが, 図 6c である. 図中 1, 2, 3 と付記した屈折率曲面は, それぞれ, 図 6b 中の拡大図に記したものに对应している. 境界面と地球磁界方向とのなす角は非常に小さいので, 境界面への垂線は磁界方向に対してほぼ垂直に近く, したがって, 大きな wave normal angle を持つ波は共鳴状態となり得る. 図 6 の場合には, 高度 3 の時にその垂線と, 周波数 f_R の屈折率曲面が交差しなくなり, 共鳴が起こっている.

ある高度での共鳴周波数 f_R は, その場所の, 屈折率一定の境界面と地球磁界方向のなす角 θ_B と, 屈折率が無限大となる wave normal angle $\theta_R(f)$ とから, 次式にしたがって決定

される。

$$\theta_R(f_R) = 90^\circ - \theta_B \quad (1)$$

もし屈折率一定の境界面が地球磁界方向と一致し、 $\theta_B = 0^\circ$ となるならば、いいかえると、地球磁界方向と正確に 90° の方向に密度勾配がある場合には、 $\theta_R(f_R) = 90^\circ$ となり、共鳴周波数は局所 LHR 周波数に一致し、その方向が 90° からずれると、それだけ、共鳴は LHR 周波数より高い周波数で起こることになる。このことは、図 4 で示された局所 LHR 周波数よりずっと高い周波数で起こっている共鳴現象の解釈を、可能にするものである。また、角度 θ_B の高度に対する変化の割合が非常に小さく無視できるとすると、 $\theta_R(f_R)$ も高度に無関係に一定となり、共鳴は、高度が変わってもある一定の共鳴角をとる周波数で起こることになる。ところが、共鳴角を決定する要素である電子サイクロトロン周波数やプラズマ密度は、高度が下がると、共に増加するため、共鳴角一定の周波数も上昇することになる。このことは、高い周波数成分ほどより低高度で共鳴状態となる、という図 6b の状況と合致する。

5. 結 論 と 考 察

EXOS-A 衛星で観測された LHR ホイスラをスペクトル解析したところ、その共鳴は局所 LHR 周波数より高い周波数でも起こっていることがわかった。その共鳴現象を説明するためには、地球磁界にはほぼ垂直な方向にプラズマ密度勾配が存在する必要がある。LHR ホイスラは、そのような密度勾配をもつプラズマ圏の中を、高高度から地球方向に、大きな wave normal angle で非タクト伝搬するホイスラモード波であると思われる。

Rev. 52 で観測された一連の LHR ホイスラの共鳴周波数は、衛星がほぼ一定な高度で低 L 値側へ移動するにしたがって、2 度にわたって上昇する傾向を示しているが、このことも、共鳴現象を解釈するための特異な密度勾配の存在と矛盾せず、密度が、低 L 値側へ磁力線にはほぼ垂直な方向に、増加していることを示すものと思われる。

3 節の最後に示した、LHR ホイスラの尾部が共鳴の後に rising tone に変化する現象については、その受信例が少ないこともあって解析は十分ではなく、今後の問題である。

ところで、以上では、LHR ホイスラの伝搬機構の定性的な議論のために、プラズマ圏をコールトと仮定して伝搬を考えたが、それが共鳴角に近い所での伝搬の厳密な取り扱いとはなり得ないことは言うまでもない。HASHIMOTO *et al.* (1977) によれば、温度の効果を考慮すると、共鳴角より大きな wave normal angle でも波は伝搬可能である。しかしその場合でも、屈折率は有限ではあるが非常に大きく、したがって、波の群速度は非常に小さくなり分

散の増大が期待され、さらに、空間的な減衰率も wave normal angle が大きくなるほど温度効果によって大きくなるため、共鳴角より大きな wave normal angle の波は、減衰のために局所的であると思われる。今後、温度効果を考慮した、より詳しい定量的検討が必要とされる。

文 献

- CARPENTER, D. L. (1966) Whistler studies of the plasmapause in the magnetosphere, 1 Temporal variations in the position of the knee and some evidence on plasma motions near the knee J. Geophys. Res., **71**, 693-709.
- HASHIMOTO, K., KIMURA, I. and KUMAGAI, H. (1977). Estimation of electron temperature by VLF waves propagating in directions near the resonance cone Planet. Space Sci., **25**, 871-877.
- HELLIWELL, R. A. (1969). Low-frequency waves in the magnetosphere. Rev. Geophys., **7**, 281-303
- KIMURA, I. (1966) : Effects of ions on whistler-mode ray tracing. Radio Sci., **1**, 269-283
- 柴田 喬・中村良治・芳野起夫・伊藤富造 (1979). EXOS-A 搭載プラズマ波観測器 南極資料, **64**, 18-29.
- SMITH, R. L. and ANGERAMI, J. J. (1968): Magnetospheric properties deduced from OGO 1 observations of ducted and nonducted whistlers. J. Geophys. Res., **73**, 1-20.
- THRONE, R. M. and KENNEL, C. F. (1967): Quasi-trapped VLF propagation in the outer magnetosphere J. Geophys. Res., **72**, 857-870
- WALTER, F. and ANGERAMI, J. J. (1969): Nonducted mode of VLF propagation between conjugate hemisphere, observations on OGO's 2 and 4 of the 'walking-trace' whistler and of doppler shifts in fixed frequency transmissions. J. Geophys. Res., **74**, 6352-6370

(1979 年 4 月 18 日受理)